

Комплексные анализаторы процессов функционирования электрооборудования электростанций

Старшинов В.А., канд. техн. наук, **Пойдо А.И.**, инж,
Рубашкин А.С., канд. техн. наук, **Рубашкин В.А.**, инж.

Московский энергетический институт (Технический университет) - ЗАО "Тренажеры для электростанций"

Особенностью управления электроэнергетических систем является иерархическое построение структуры оперативного персонала, предусматривающее жесткую подчиненность по характеру, объему и временной последовательности действий; наличие огромного объема нормативно-технической документации, положений и инструкций, определяющих режим работы оборудования, последовательность оперативных действий персонала и рамки допустимых воздействий на оборудование. При этом специалисты каждого уровня должны:

иметь максимальный уровень подготовки в объеме своих служебных обязанностей;

иметь представление об обязанностях вышестоящего оперативного персонала;

знать в основном служебные обязанности нижестоящего оперативного персонала и уметь их выполнять.

Для каждого уровня оперативного персонала должны быть свои средства подготовки и повышения квалификации. Нецелесообразно создавать средство подготовки персонала, которое с максимальными деталями охватывает несколько иерархических слоев оперативного персонала. Поэтому каждое средство подготовки должно:

в полном объеме воспроизводить деятельность персонала того уровня, для которого оно создано;

отражать деятельность персонала низшего уровня только в той части, которая влияет на оперативные действия персонала данного уровня.

До недавнего времени не существовало технических средств подготовки и переподготовки персонала высшего на электростанции оперативного уровня, включая начальников смен станции, начальников смен электроцехов, начальников электролаборатории. Были попытки создания указанных тренажеров с использованием средств аналоговой техники, однако полноценного учебного средства создать не удалось.

Суть служебных обязанностей указанного персонала заключается в основном в принятии технологических решений, обеспечивающих:

заданный режим работы станции;

ликвидацию аварийных ситуаций в электрической части станции;

обеспечение надежной эксплуатации электро-технического оборудования.

В 2004 г. фирмой "Тренажеры для электростанций" совместно с кафедрой электрических станций МЭИ была создана программная система, которая обеспечивает требуемое качество подготовки указанного персонала. Данная программная система получила название "Комплексный анализатор процессов функционирования электрооборудования электростанции".

Точные off-line расчеты статических и переходных режимов сложных электрических схем давно уже не представляют серьезных трудностей. Существуют программы, которые могут рассчитать электрическую схему, состоящую из тысяч узлов. Однако эти программы требуют значительного

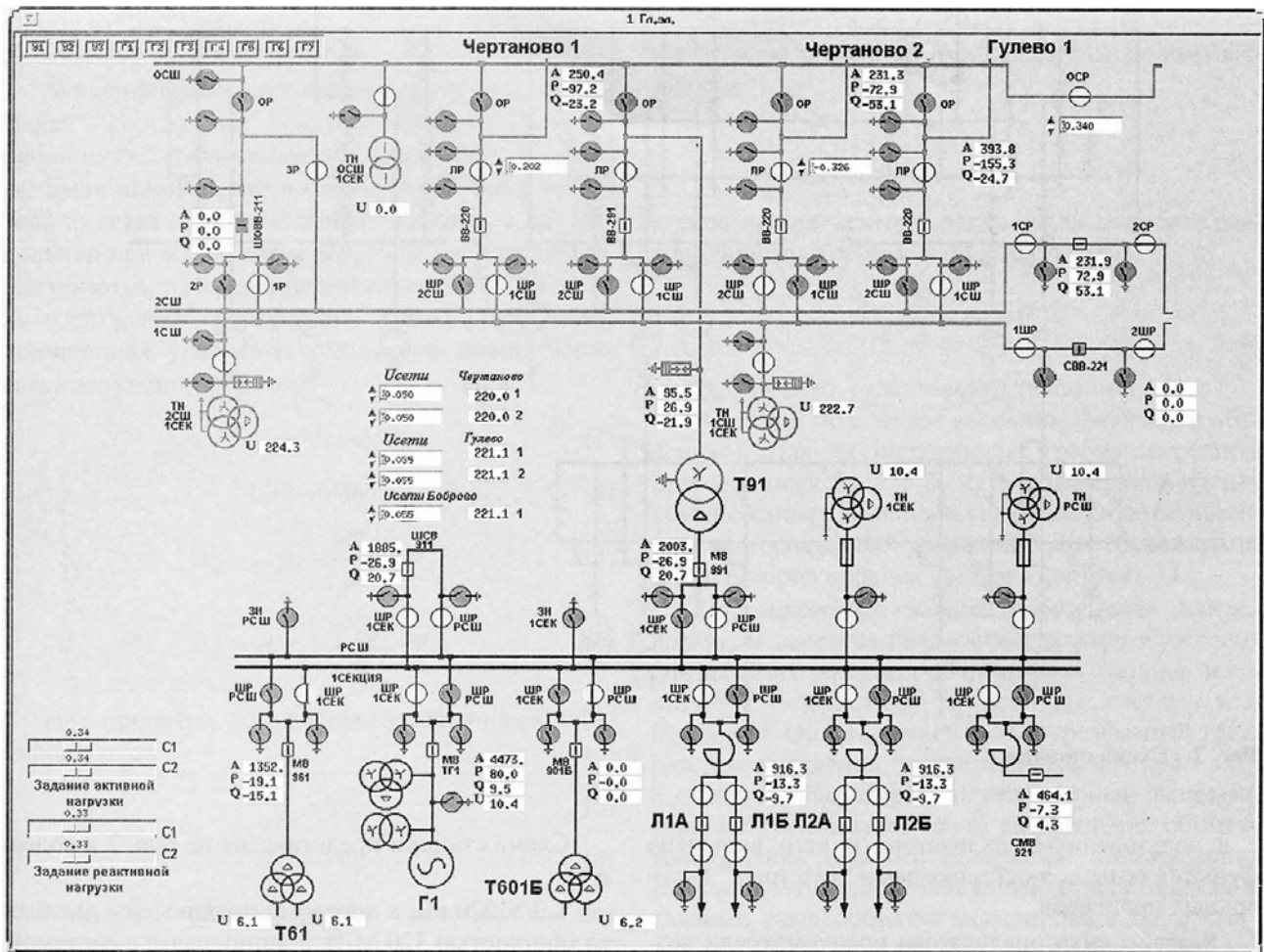


Рис. 1. Видеограмма части мнемосхемы управления тренажером

времени для подготовки исходных данных и для собственно вычислений. Разработка моделей такого же качества для расчета статических и динамических режимов работы электрических схем в реальном времени с удобным пользовательским интерфейсом (например, в составе современных тренажеров для подготовки электриков) до сих пор является трудноразрешимой задачей.

Анализатор создается для конкретной станции с учетом всех ее особенностей, поэтому позволяет достаточно точно вычислять основные параметры электрической схемы при любом изменении конфигурации. Технические проблемы, которые пришлось решить при создании такой модели, относятся к следующим областям:

- алгоритмы функционирования отдельных элементов электрической схемы;
- численные методы решения систем уравнений;
- оптимизация скорости решения;
- организация программной структуры;
- комплексная отладка сложных систем. Очевидно, что для успешного решения задачи предсказания режима работы электрической части

станции анализатор должен полноценно моделировать:

- генераторы любого типа, включая их системы возбуждения;
- трансформаторы;
- выключатели;
- устройства релейной защиты;

системы автоматического регулирования; системы противоаварийной автоматики. Крайне важно, что разработанный комплекс позволяет производить вычисления протекающих в электрооборудовании процессов в реальном масштабе времени.

Комплексный анализатор не требует утомительной подготовки исходных данных для расчета. Он имеет дружелюбный, интуитивно понятный интерфейс, что позволяет легко научиться его использовать. На рис. 1 показана видеограмма части мнемосхемы управления тренажером.

Имея высокоточную модель, можно не только предсказывать режим работы электрической части станции, но и анализировать произошедшие в электрической части станции аварийные ситуации. Для облегчения анализа аварийных ситуаций

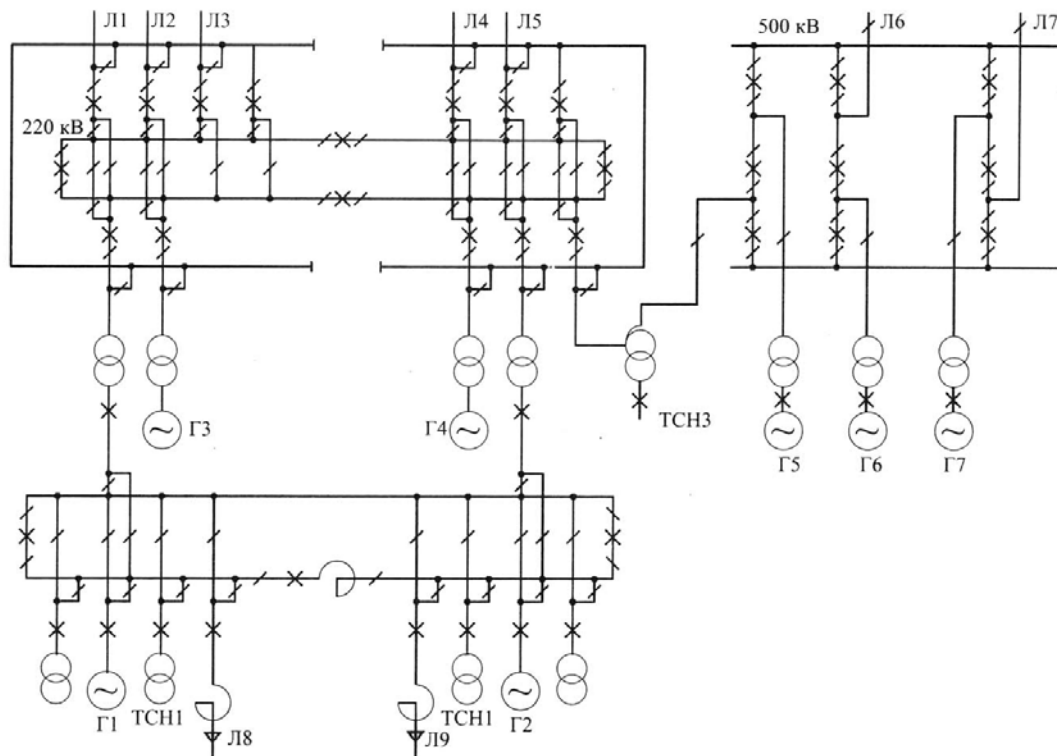


Рис. 2. Схема станции

с использованием анализатора в него включена функция создания осциллограмм "быстрых" переходных процессов.

Разработчики анализатора предусмотрели возможность оснастить его подсистемой поддержки обучения персонала (дополнительная опция). В такой конфигурации анализатор оснащен следующими дополнительными функциями:

дополнительными защитами и блокировками, которых нет на реальной станции, но которые предупреждают обучаемого о приближении к аварийной ситуации за несколько шагов до нее;

подсистемой вычисления остаточной надежности электрической схемы при оперативных переключениях и интегральной оценки процесса переключения по условиям надежности;

подсистемой автоматической оценки знаний обучаемого персонала;

традиционными сервисными функциями обучающих систем, такими как загрузка исходного состояния, сохранение текущего состояния, режимы реальное/ускоренное время, режимы работа/останов решения с последующим продолжением, возможность повторения ранее выполненных действий, предупреждение о перегрузках оборудования; возможностью работы в локальной сети одновременно на нескольких компьютерах.

Далее приводятся описание тренажера-анализатора, разработанного для одной из ТЭЦ Мосэнерго, и результаты тестирования.

Схема станции представлена на рис. 2 и содержит:

1. РУ 220 кВ, к которому подключены два блока мощностью 320 МВт, 5 линий связи с системой, автотрансформатор связи с РУ 500 кВ и два трансформатора связи с РУ 10 кВ. РУ 220 кВ выполнено по схеме две системы шин с обходной системой шин. Шины разделены секционными выключателями на две секции.

2. РУ 10 кВ, к которому подключены трансформаторы связи с РУ 220 кВ, 8 линий нагрузки, два генератора мощностью по 120 МВт, основные и резервные трансформаторы собственных нужд, РУ 10кВ выполнено по схеме одна секционированная система шин с резервной системой шин, в цепь секционного выключателя включен секционный реактор.

3. РУ 500 кВ, к которому подключены две линии связи с системой на напряжении 500 кВ, автотрансформатор связи с РУ 220 кВ, три генератора мощностью по 320 МВт. РУ 500 кВ выполнено по схеме 3/2 выключателя на присоединение. К третичной обмотке автотрансформатора связи РУ 220 кВ - РУ 500 кВ подключен резервный трансформатор собственных нужд указанных трех генераторов. Основные трансформаторы собственных нужд подключены непосредственно к трансформаторам генераторов на напряжении генераторов.

Математические модели, принятые при разработке тренажера. *Моделирование генераторов.* Все генераторы моделировались в системах коор-

динат, жестко связанных с ротором каждого, так называемых, d, q координатах.

Моделирование производилось по уравнениям Парка - Горева, при этом учитывались только периодические составляющие токов в обмотке статора. Было принято, что по поперечной оси q на роторе имеется одна демпферная обмотка, а по продольной оси d - обмотка возбуждения и демпферная обмотка, рассеивание магнитного потока между которыми достаточно мало. При этих допущениях уравнения генератора можно записать следующим образом:

$$U_q = U \cdot \cos \delta \quad (1)$$

$$U_d = -U \cdot \sin \delta \quad (2)$$

$$U_q = -i_q r_a - \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \quad (3)$$

$$U_d = -i_d r_a - \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \quad (4)$$

При принятых допущениях уравнения (3) и (4) упрощаются:

$$U_q = \Psi_d \quad (5)$$

$$U_d = -\Psi_q \quad (6)$$

Уравнения обмоток ротора записываются без упрощений

$$U_f = i_f r_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (7)$$

$$0 = i_{1d} r_{1d} + \frac{d\Psi_{1d}}{dt} \quad (8)$$

$$0 = i_{1q} r_{1q} + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} \quad (9)$$

Токи $i_d, i_q, i_f, i_{1d}, i_{1q}$ и потокосцепления обмоток связаны уравнениями

$$\Psi_d = i_d x_d + i_{1d} x_{ad} + i_f x_{ad}$$

$$\Psi_q = i_q x_q + i_{1q} x_{aq}$$

$$\Psi_{1d} = i_d x_{ad} + i_{1d} x_{1d} + i_f x_{ad}$$

$$\Psi_{1q} = i_q x_{aq} + i_{1q} x_{aq}$$

$$\Psi_f = i_d x_{ad} + i_{1d} x_{ad} + i_f x_f$$

Электромагнитная мощность синхронной машины определяется по выражению:

$$P_{эм} = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d$$

Реактивная мощность определяется по выражению

$$Q = \Psi_d i_d + \Psi_q i_q$$

Внутренний угол δ между вектором напряжения и осью координат q определяется по выражению:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_c \cdot S$$

а скольжение вектора напряжения относительно координатных осей d, q по выражению:

$$T_J \frac{dS}{dt} = P_T - P_{эм}$$

где P_T - момент, развиваемый турбиной.

В данной модели все величины физически объяснимы. Для их определения требуется решить при заданных P_T, U_T, U_f пять дифференциальных обыкновенных линейных уравнений и пять линейных алгебраических уравнений. Для тренажера из 7 генераторов порядок системы составит 35.

Моделирование систем возбуждения генераторов. В качестве базовой системы возбуждения синхронных генераторов на данной станции используется независимая тиристорная система возбуждения. Она включает в себя трехфазный генератор возбуждения, установленный на одном валу с главным генератором, и тиристорный выпрямитель, который питает токком возбуждения обмотку возбуждения главного генератора. Исследования показали, что вспомогательный генератор, как и главный, целесообразно моделировать в d, q координатах. При этом расчеты показывают, что для определения напряжения возбуждения главного генератора вспомогательный генератор может моделироваться в переходных режимах только по оси d , а выпрямитель моделироваться по внешней характеристике. При этом для вспомогательного генератора можно не учитывать переходные процессы в статоре. Это позволяет записать основные уравнения возбудителя в виде

$$U_{fv} = i_{fv} r_{fv} + \frac{d\Psi_{fv}}{dt}$$

Вводя расчетные переменные

$$dE'_{qv} = \Psi_{fv} \frac{x_{adv}}{x_{fv}}$$

$$E_{qv} = i_{fv} x_{adv}$$

получим уравнение вспомогательного генератора в виде

$$\frac{dE'_{qv}}{dt} = \frac{U_{fv} - E_{qv}}{T_{f0v}}$$

При моделировании тиристорного выпрямителя предполагается, что параметры вспомогательного генератора выбраны таким образом, что выпрямитель системы возбуждения работает в режи-

ме 2-3. Поэтому напряжение возбуждения и ток возбуждения главного генератора связаны соотношением

$$U_{fT} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E'_{qv} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} x'_{dv} I_{fT}$$

Угол коммутации тиристорov выпрямителя зависит от тока возбуждения главного генератора, ЭДС возбудителя E' и угла управления вентилей α , задаваемого регулятором возбуждения. Они связаны следующим соотношением:

$$\gamma = \arccos \left[\cos \alpha - \frac{2x'_{dv} I_{fT}}{\sqrt{6} E'_{qv}} \right] - \alpha$$

Отсюда определяются активный, реактивный и полный ток статора возбудителя

$$I_{av} = \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[\frac{2\gamma + \sin 2\alpha - \sin(\alpha + \gamma)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} \right] I_{fT}$$

$$I_{rv} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)] I_{fT}$$

$$I_v = \sqrt{I_{av}^2 + I_{rv}^2}$$

и положение вектора тока вспомогательного генератора относительно его напряжения

$$\cos \varphi_v = \frac{I_{av}}{I_v} \quad \sin \varphi_v = \frac{I_{rv}}{I_v}$$

Это позволяет определить напряжение на вспомогательном генераторе

$$U_v = \sqrt{(E'_{qv} - \sin \varphi_v \cdot I_v \cdot x'_{dv})^2 + (I_v x'_{dv} \cos \varphi_v)^2}$$

Внутренний угол вспомогательного генератора определяется по выражению

$$\Theta_v = \arctg \frac{I_v x'_{dv} \cos \varphi_v}{E'_{qv} - I_v x'_{dv} \sin \varphi_v}$$

Угол между вектором тока и осью q вспомогательного генератора будет в этом случае равен

$$F_v = \varphi_v - \Theta_v$$

а ЭДС E_{qv} определяется из выражения

$$E_{qv} = \sqrt{(U_v \cos F_v)^2 + (U_v \sin F_v + I_v x'_{dv})^2}$$

Из изложенного следует, что для определения напряжения возбуждения генератора U_f по его току возбуждения i_f , а также углу регулирования возбудителя α требуется решение нелинейного дифференциального уравнения, правая часть которого вычисляется достаточно сложно. Напряжение возбуждения возбудителя U_{fv} задает регулятор поддерживающий условие $E'_{qv} = \text{const}$ для стационарного режима.

Моделирование элементов электрической сети.

Отказ от учета апериодических составляющих токов при моделировании генераторов позволяет моделировать элементы сети с тем же допущением. Допустим, в координатах d, q жестко связанных с вектором ЭДС энергосистемы, в схеме связанной с этой системой заданы две точки 1 и 2, которые характеризуются соответственно вектором напряжения \vec{U}_1 и углом δ_1 этого вектора относительно оси q системы и вектором напряжения \vec{U}_2 и углом δ_2 . В этом случае мы можем взять за точку отсчета точку 2 и считая, что на интервале итеративного расчета \vec{U}_1, δ_1 не зависят от \vec{U}_2, δ_2 получим для индуктивного сопротивления x_{12} , включенного между точками 1 и 2

$$Q_2 = \frac{U_2^2}{x_{12}} - \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \cos \delta_{12}$$

$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \sin \delta_{12}$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{x_{12}} + \frac{x_1 x_2}{x_{12}} \cos \delta_{12}$$

В каждом узле схемы выполняется закон Кирхгофа по мощности для i -ветвей

$$\sum_i P_i = 0 \quad \text{и} \quad \sum_i Q_i = 0$$

Задачей расчета электрической сети является определение потоков мощности от узла к узлу. Таким образом, достаточно в итеративном цикле задать одну ветвь, связанную с системой неотключаемой и принять ее параметры такими, чтобы потоки мощности по ветви незначительно в пределах допуска влияли на сумму мощностей в узлах, то задача становится определимой. При этом для каждой ветви ток определяется как вторичная переменная

$$I = \frac{\sqrt{P_{12}^2 + Q_2^2}}{U_2}$$

Моделирование турбин Моделирование турбин не является целью данного тренажера, однако, стационарный режим системы немислим без задания

$$P_T = f(S)$$

В этом случае упрощенно моделируется регулятор турбины

$$\rho = -\mu - \frac{S}{\sigma} + \mu_0$$

$$T_c \frac{dM}{dt} = \rho$$

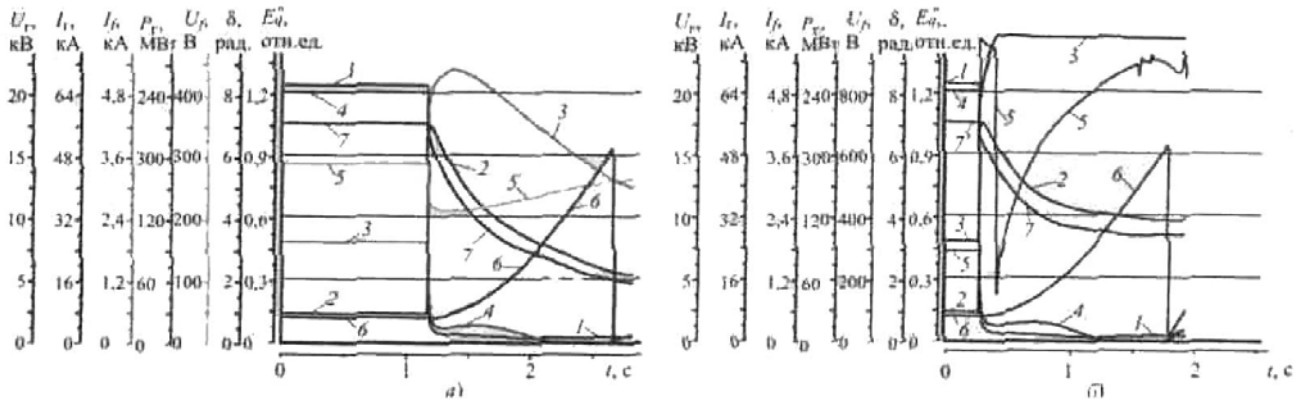


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов:

а - опыт 1, КЗ на выводах генератора при отключенной системе автоматического регулирования возбуждения; б - опыт 2, КЗ на выводах генератора при включенном регуляторе возбуждения; 1 - напряжение генератора U_g ; 2 - ток генератора i_i ; 3 - ток возбуждения генератора i_f ; 4 - активная мощность генератора P_g ; 5 - напряжение возбуждения генератора U_f ; 6 - угол δ между вектором напряжения генератора и координатной осью q ; 7 — сверхпереходная ЭДС генератора E'_{fd}

где ρ - относительное открытие окон золотника; μ - относительное перемещение поршня сервомотора; T_c - постоянная времени сервомотора; σ - статизм регулятора.

Мощность, развиваемая турбиной при незначительных значениях S , определяется выражением

$$P_T = \mu \text{ при } \mu \geq 0$$

$$P_T = 0 \text{ при } \mu < 0$$

Параметризация модели. Как правило, заводы-изготовители не предоставляют всех параметров, необходимых для построения модели, поэтому второй сложной задачей является определение параметров, необходимых для моделирования. Если для линий связи, трансформаторов, реакторов параметры моделирования и паспортные данные совпадают, то для электрических машин генераторов приходится разрабатывать методики определения параметров модели. Так, для генераторов такие параметры, как x_{ad} , x_{aq} , x_{ld} , x_{lq} , x_f , r_{ld} , r_{lq} заводы не предоставляют; не даются многие параметры по системам возбуждения, причем сотрудники электростанций также не знают этих параметров. При этом изготовитель тренажеров вынужден разрабатывать методики расчета необходимых параметров по параметрам, предоставляемым заводом. Это связано с тем, что по предоставляемым заводом параметрам можно построить только статическую модель, для построения динамических моделей требуется расчет дополнительных параметров по достаточно известным и апробированным методикам.

Задача тестирования. Основная задача проведенного тестирования - дать представление о качестве модели объекта и о том, с какой полнотой воспроизведены в ней основные закономерности процессов. В ряде случаев даны результаты достаточно искусственных опытов, которые, тем не ме-

нее, дают представление о качестве моделирования.

Тестирование модели генератора ТВВ-320-2У3 и системы возбуждения. Для тестирования модели генератора и системы возбуждения выбран режим внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах генератора. При этом угол регулирования тиристорной системы возбуждения α был принят постоянным, а система автоматического регулирования возбуждения была отключена. В этом случае тестируется и модель генератора возбуждения. Осциллограмма переходного процесса изображена на рис. 3. Поскольку в модели используются периодические функции угла δ , при работе модели при достижении углом значения 2π отсчет начинается с 0.

Исходный режим ротора генератора принят отличным от номинального режима. Режим генератора непосредственно перед КЗ приведен далее, он одинаковый в первом и втором опытах. Исходные данные приведены в системе относительных единиц при следующих базисных значениях: $S_{баз} = S_{ном} = 375 \text{ МВА}$, $I_{баз} = I_{ном} = 10825 \text{ А}$, $U_{баз} = U_{ном} = 20 \text{ кВ}$.

Потокоцепление:

$$\text{обмотки возбуждения} \quad \psi_f = 0.9789$$

$$\text{демпферной обмотки по оси d} \quad \psi_{ld} = 0.8231$$

$$\text{демпферной обмотки по оси q} \quad \psi_{lq} = 0.6391$$

Проекция вектора:

$$\text{тока генератора на ось d} \quad I_d = -0.4825$$

$$\text{напряжения генератора на ось d} \quad U_d = -0.6886$$

$$\text{тока генератора на ось q} \quad I_q = 0.629$$

$$\text{напряжения генератора на ось q} \quad U_q = 0.7668$$

$$\text{Активная мощность генератора} \quad P_{эм} = 0.641$$

$$\text{Ток возбуждения} \quad I_f = 1.0035$$

$$\text{Напряжение генератора} \quad U_g = 1.029$$

Коэффициент мощности генератора

$$\cos \varphi_g = 0.9897$$

ЭДС генератора:

$$\text{сверхпереходная} \quad E_q'' = 1.0502$$

$$\text{переходная} \quad E_q' = 1.0645$$

$$\text{синхронная} \quad E_q = 1.586$$

Результаты опыта представлены на рис. 3, а. Он демонстрирует графики изменения переменных во время теста.

В именованных единицах на приведенной осциллограмме установлен следующий исходный режим: $U_r = 20.588$ кВ, $I_r = 6933$ А, $\delta = 0.733$ рад, $U_f = 285$ В, $I_f = 1920$ А. Там же приведена расчетная ЭДС $E_q'' = 1.0502$, которая определяется по выражению:

$$E_q'' = \sqrt{(U_r \cdot \cos \varphi_r)^2 + (U_r \cdot \sin \varphi_r + x_d'' \cdot I_r)^2}$$

При возникновении КЗ в обмотке статора ток статора возрастает до $I_r = 55.5$ кА, а ток возбуждения – до $I_{f_r} = 4.54$ кА. Далее по мере затухания тока в демпферных обмотках по оси d он увеличивается до $I_{f_r \max} = 5.26$ кА и далее уменьшается по экспоненциальному закону до исходного значения $I_{f_r} = 1.92$ кА.

Тестируемый генератор имеет тиристорную систему возбуждения. Учитывая электрическую инерцию вспомогательного генератора T_{fov} и внешнюю характеристику выпрямителя при изменении тока возбуждения от 1.92 до 4.54 кА следует ожидать уменьшение U_{f_r} . В данном случае уменьшение произошло с 285 В до 221 В. Это, а также принятое допущение об отсутствии апериодических составляющих токов вызвало быстрое уменьшение ЭДС E_q'' от 1,0502 до 0,955 о.е. Это явление характерно для тиристорных и диодных систем возбуждения.

Для определения максимального значения то КЗ используем выражение:

$$I_{K3}^{расч.} = \frac{E_q''}{x_d} \cdot I_{\delta аз} + I_{d0} \cdot I_{\delta аз}$$

где I_{d0} – исходное значение тока генератора по оси d до возникновения КЗ. При принятых базисных условиях $I_{d0} = -0.4825 \cdot I_{r \text{ ном}} = -0,4825 \cdot 10,825 = -5,223$

Таким образом расчетное значение максимального тока КЗ:

$$I_{K3}^{расч.} = \frac{0,955}{0,173} \cdot 10825 - 0,4825 \cdot 10,825 = 54,542 \text{ кА}$$

По осциллограмме в результате расшифровки получаем:

$$I_{K3}^{изм.} = 55.5 \text{ кА}$$

Ошибка в расчетах и измерениях будет равна

$$\Delta I_{K3} = \frac{|I_{K3}^{расч.} - I_{K3}^{изм.}|}{I_{K3}^{расч.}} \cdot 100 = \frac{|54,542 - 55,5|}{54,542} \cdot 100 = 1,75\%$$

Оценка точности по максимальному значению тока КЗ охватывает модель генератора и модель системы возбуждения, поэтому она наиболее достоверна.

Влияние регулятора тока возбуждения на переходные процессы при КЗ. Для оценки влияния регулятора тока возбуждения был выполнен опыт -КЗ на выводах генератора при включенном регуляторе возбуждения. Регулятор тока возбуждения воздействует на угол а открытия тиристорov возбуждителя. Регулятор содержит несколько каналов регулирования:

- по отклонению напряжения на генераторе;
- по току статора;
- по первой и второй производным тока статора;
- по отклонению частоты генератора;
- по производной отклонения частоты.

Кроме того, в регулятор входят вспомогательные каналы:

- канал ограничения максимального тока возбуждения допустимой величиной форсировки возбуждения;
- канал ограничения минимального тока возбуждения.

Существуют также дополнительные стабилизирующие каналы.

Во время опыта были включены каналы по отклонению напряжения, по производной отклонения частоты, канал ограничения максимального тока возбуждения. В качестве исходного режима был принят такой же режим, как для первого опыта. Как известно, при КЗ на выводах генератора регулятор возбуждения увеличивает напряжение возбуждения до предельного. В опыте напряжение возбуждения увеличилось с $U_f = 285$ В до $U_f = 960$ В т.е. в 3.36 раза. Если не принимать дополнительных мер, ток возбуждения также увеличится в 3,36 раз с $I_f = 1920$ А до $I_f = 6467$ А, что недопустимо. При достижении током I_f величины 5860 А, канал по ограничению тока возбуждения компенсирует действие остальных каналов, как это следует из изменения U_f на рис. 3, б.

Исследования синхронных генераторов показали, что увеличение регулятором напряжения возбуждения практически не влияет на максимальное значение периодической составляющей тока статора, что полностью подтверждается при сопоставлении их по опыту 1 и 2. В обоих случаях наибольшее значение тока статора составляет $I_r = 55,7$ кА.

Однако в дальнейшем изменение тока

статора происходит по различным законам и устанавливаются различные предельные значения тока статора в установившемся режиме КЗ. Во всех случаях ток статора в установившемся режиме определяется по выражению

$$I_{ст.уст} = \frac{E_{qуст}}{x_d}$$

В первом опыте в установившемся режиме, как известно, E_q равна исходному значению до КЗ $E_q = 1,58$ отн. ед., $x_d = 1,698$ отн. ед., $E_{qуст} = 0,94$ отн. ед.

В именованных единицах $I_{КЗуст} = 10,18$ кА. При увеличении тока возбуждения до 5,86 кА, т.е. в 3,08 раза, установившийся ток КЗ генератора увеличится пропорционально до 31,329 кА. В опыте 2 установившийся ток КЗ, как следует из осциллограммы, равен 32 кА, т.е. ошибка по току КЗ при моделировании турбогенератора, системы возбуждения и регулятора возбуждения составляет

$$\Delta I = \frac{32 - 31,397}{32} \cdot 100 = 1,8\%$$

Выводы

Использование моделей такого класса точности в тренажерах для подготовки оперативного персонала электроцехов станций выводит такие тренажеры на новый уровень качества. Если тренажер с такой моделью создан специально для конкретной электростанции, то его можно использовать для следующих целей:

тренировки электротехнического оперативного персонала;

разбора и воспроизведения реальных аварийных ситуаций, произошедших на электростанции из-за неисправности электрооборудования;

предсказания режима работы электрической станции, который установится в результате запланированных переключений.

Широкое использование тренажеров такого класса может позволить значительно снизить число аварий на электростанции по вине персонала и из-за неисправностей электрооборудования.